



基于电机转速的联轴节早期松弛故障 在线监测与诊断

王 龙¹, 潘光云², 吴云飞¹, 陆远基¹, 牟 蓉¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 国能新朔铁路有限责任公司 机务分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘 要: 城市轨道交通车辆牵引系统通过联轴节耦合电机与齿轮箱, 其连接状态直接决定牵引力与电制动力是否能有效传递。对车辆牵引、惰行与电制动工况进行电机轴受力分析后发现, 联轴节发生早期松弛后, 该故障轴对应电机的转速在牵引工况下会显著高于正常轴, 而在电制动工况下则显著较低。文章针对转速差的这一特征, 提出了一种故障诊断方法: 充分考虑轮径差与空转/滑行状态对转速的影响, 结合车辆牵引/电制动特性选取合适的诊断阈值、诊断速度区间与延时时间, 设计相应的故障诊断逻辑并根据具体工程化项目的车辆特性参数设置合理的诊断阈值等参数, 构建了实用的诊断模型。工程应用实例验证了该方法的有效性: 成功识别出一起联轴节早期松弛故障, 通过数据分析可知发生联轴节松弛后的速度特点符合理论预测, 拆解电机轴联轴节后发现电机轴有明显磨损痕迹。该研究为联轴节早期松弛故障提供了一种高效、可靠的在线监测解决方案。

关键词: 城市轨道交通车辆; 联轴节早期松弛; 转速差; 故障诊断; 状态监测

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0097-08

0 引言

目前, 国内主要大型城市的城轨线路已陆续建成并投入运营。作为公共交通工具, 城市轨道交通车辆的安全性与可靠性是车辆设计中重要的评价指标^[1]。车辆牵引时, 牵引电机产生牵引扭矩, 该扭矩首先通过与电机轴过盈配合的半联轴节传递到联轴节螺栓, 再通过与齿轮箱小齿轮轴过盈配合的另一半联轴节传递到齿轮箱; 随后, 通过齿轮箱内部的大小齿轮啮合, 最终将牵引力传递到车轴, 实现牵引力的传递, 驱动列车加速运行。同理, 车辆电制动时, 制动力从牵引电机通过联轴节、齿轮箱最终传递到车轴, 实现车辆制动。

牵引电机、联轴节及齿轮箱作为牵引力与电制动力产生与传递的关键部件, 其运行状态监测是保障车辆安全、稳定运营的重要手段^[2-3]。目前, 城市轨道交通

辆对电机与齿轮箱均已有的运行状态监测, 走行部在线监测系统在电机轴与齿轮箱小齿轮轴正上方布置有温度与振动复合传感器, 可在线实时监测齿轮箱与电机的工作状态并对异常状态进行预警。同时, 牵引电机内部布置有温度和速度传感器, 可实时监测电机内部温度以及速度情况, 对电机异常情况进行预警。联轴节作为牵引力、制动力传递的纽带, 受其结构尺寸的限制, 难以直接安装传感器对其状态进行实时监测, 通常只能通过分析电机、齿轮箱的相关参数进行间接判断^[4-9]。

为解决上述联轴器状态直接监测困难的问题, 本文通过研究联轴器松弛时电机轴的运行特性, 提出一种基于电机转速监测的联轴节早期松弛故障间接诊断方法。该方法结合现有的车辆特性设定诊断阈值, 并综合考虑了轮径差、空转/滑行等运行状态带来的影响, 旨在提升诊断的准确性与可靠性。

通信作者: 吴云飞, 男, 从事城市轨道交通牵引辅助系统研发工作; E-mail: 15151810914@163.com

引用格式: 王龙, 潘光云, 吴云飞, 等. 基于电机转速的联轴节早期松弛故障在线监测与诊断[J]. 机车电传动, 2025(4): 97-104.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.012.

Citation: WANG Long, PAN Guangyun, WU Yunfei, et al. Research on online monitoring and diagnosis of early coupling relaxation fault based on motor speed[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 97-104.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.012.

1 联轴节松弛机理分析

1.1 齿轮传动系统构成

牵引电机、齿轮箱以及联轴节共同构成轨道交通列车齿轮传动系统,传递牵引力和制动力,驱动列车牵引与减速。齿轮传动系统组合如图1所示。

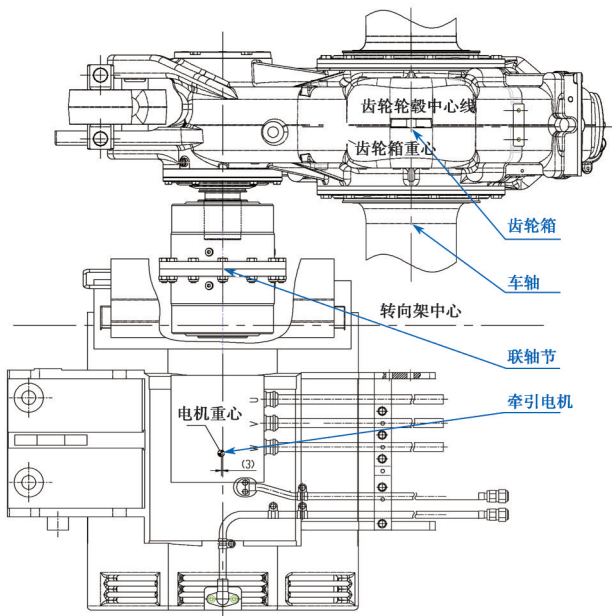


图1 齿轮传动系统组合图

Fig. 1 Assembly diagram of gear transmission system

牵引电机通过螺栓连接安装在转向架构架的电机安装座上。齿轮箱大齿轮套在车轴上,齿轮箱箱体通过吊杆螺栓连接固定在转向架构架的吊杆安装座上。半联轴节通过过盈连接分别压装在牵引电机轴与齿轮箱小齿轮轴处,2个半联轴节通过螺栓连接组成完整联轴节,将牵引电机与齿轮箱耦合起来。由图1可知,联轴节是齿轮传动系统的关键部件,其连接状态直接决定牵引力、制动力是否能有效传递。

1.2 联轴节松弛受力分析

正常情况下,当电机轴、齿轮箱轴与联轴节的过盈配合完好时,轴与联轴节之间没有相对运动,牵引力与电制动力可通过联轴节有效传递到车轴。当过盈配合出现松弛时,牵引力与电制动力将不能有效传递,研究团队以电机轴与联轴节过盈配合松弛为例,研究电机轴在牵引状态、电制动状态以及惰行状态的受力情况以及速度变化趋势。

1.2.1 牵引工况受力分析

在牵引工况下,电机转子受到定子磁链作用产生牵引转矩,转子轴通过联轴节将转矩传递到齿轮箱,最终传递到车轴,驱动列车运行。以齿轮箱一级传动为研究对象,电机转子受力情况如图2所示。

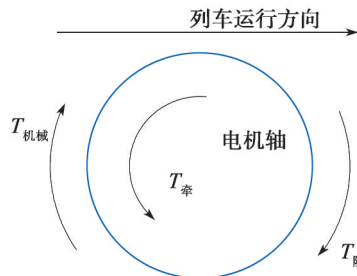


图2 牵引工况下电机转子受力示意

Fig. 2 Schematic of force applied on motor rotor during traction

图2中, $T_{牵}$ 为电机牵引转矩; $T_{阻}$ 为阻止电机轴加速转动的阻力转矩; $T_{机械}$ 为由轴承等的机械阻力转矩构成的转矩,与电机旋转方向相反。

电机转子在牵引转矩与阻力转矩的共同作用下加速旋转,转子角加速度为

$$\beta = (T_{牵} - T_{阻} - T_{机械}) / J \quad (1)$$

式中: β 为电机转子角加速度; J 为电机转子转动惯量,与转子质量和安装位置有关,随着电机方案的确定而定。

在电机牵引转矩的作用下,电机加速旋转,电机转速为

$$\omega_{牵}(t) = \int \frac{T_{牵} - T_{阻} - T_{机械}}{J} dt \quad (2)$$

当联轴节发生早期松弛时,由于联轴节与电机轴之间的压力变小,联轴节不能有效将齿轮箱传递的阻力施加到电机轴,因此,电机轴角加速度较未松弛时大,最终体现出转速较未松弛时快。由于电机转矩与转差率相关,其转速在达到某一平衡点后便会趋于稳定。电机转矩与转差率特性曲线如图3所示。

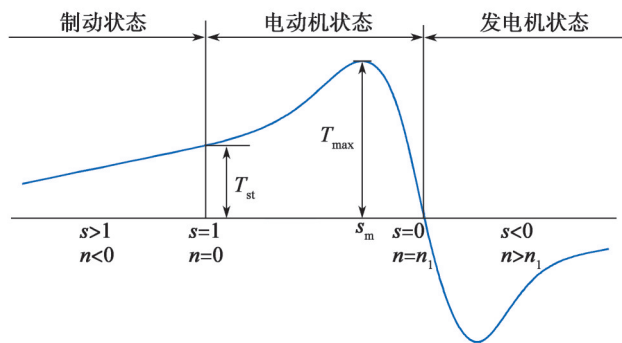


图3 异步电机转矩-转差率特性曲线

Fig. 3 Torque-slip characteristic curve of induction motor

图3中, s 为转差率, n 为电机转速, T_{st} 为电机启动转矩, T_{max} 为电机最大转矩, s_m 为最大转矩对应的转差率, n_1 为电机同步转速。

如图3所示,随着转差率变化,存在最大转矩点。对于城市轨道交通领域电机控制,从电机转速为0到转速达到恒力-恒功转折点,电机转矩维持在最大转矩工况下运行,因此,图3中 $s_m = 1$ 。

在车控模式下,一台逆变器输出控制4台并联的牵

引电机, 因此4台电机定子磁链转速是一致的, 当其中1台电机由于联轴节松弛, 其负载阻力变小, 转子速度相比其他电机转子速度增加得更快, 导致转差率也相应减小。根据图3所示的电机转矩-转差率特性曲线, 转差率降低, 电机发挥的转矩也相应降低, 随着转矩降低, 电机转速增加趋势放缓, 最后达到新的平衡。因此, 当联轴节松弛时, 在牵引工况下其对应轴的电机转速较其他轴快, 具体取决于牵引级位以及联轴节松弛程度。

1.2.2 电制动状态受力分析

与前面的分析同理, 在电制动工况下, 电机转子受到气缝磁场作用产生制动转矩, 转子轴通过联轴节将转矩传递到齿轮箱, 最终传递到车轴, 阻止列车前进或后退。以齿轮箱1级传动为研究对象, 电机转子受力情况如图4所示。

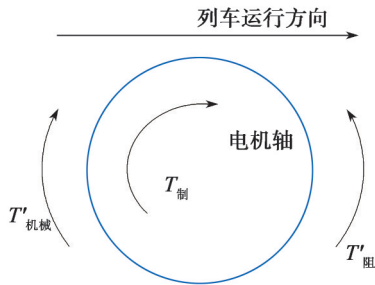


图4 电制动工况下电机转子受力示意

Fig. 4 Schematic of force applied on motor rotor during electric braking

图4中, $T_{制}$ 为电机制动转矩; $T'_{阻}$ 为列车前进或后退带来的惯性阻力转矩, 与电制动转矩方向相反; $T'_{机械}$ 为由轴承等的机械阻力转矩构成的转矩, 与电机转动方向相反。

电机转子在电制动转矩与阻力转矩的共同作用下减速旋转, 转子角减速度为

$$\beta' = (T_{制} - T'_{阻} + T'_{机械})/J \quad (3)$$

式中: β' 为电机转子角减速度。

在电机电制动转矩的作用下, 电机减速旋转, 电机转速为

$$\omega'(t) = \omega_0 - \int \frac{T_{制} - T'_{阻} + T'_{机械}}{J} dt \quad (4)$$

式中: ω_0 为电机转子初始角速度。

根据图4可知, 在电制动工况下, 定子磁链与转子旋转方向相反, 转差率大于1。在车控模式下, 1台逆变器驱动4台并联的牵引电机, 因此各电机的定子磁链保持同步旋转。当其中1台电机的联轴节出现松弛, 其负载阻力将减小。在初始电制动转矩相同的条件下, 该故障电机的转子速度比其他正常电机转子速度下降更快, 导致转差率也相应减小 (更接近1), 电机发挥的电制动转矩也相应降低, 随着转矩降低, 电机转速下降趋势放缓, 最后达到新的平衡。因此, 当联轴节松弛时, 在电制动工况下, 其对应轴的电机转速低于其他正常车轴,

具体降低幅度与电制动级位及联轴节松弛程度相关。

1.2.3 惰行状态受力分析

在惰行工况下, 电机轴不传递牵引力、电制动力, 只受到通过联轴节传递的与转动方向相反的机械阻力, 由于阻力均较小, 发生早期联轴节松弛故障时并不会造成电机轴和联轴节产生相对运动。因此, 发生早期联轴节松弛故障对应的电机转速在惰行工况下与其他同车电机转速基本一致。

2 联轴节松脱诊断研究

前文对电机联轴节早期松弛时牵引、电制动、惰行各工况下的受力进行了分析, 得出牵引工况下对应电机转速会高于同车其他正常电机; 制动工况下对应电机转速低于同车其他正常电机, 并与级位以及联轴节松弛程度相关; 惰行工况下对应电机转速与同车其他轴电机转速基本一致。基于以上分析, 可通过在牵引、制动、惰行工况下分别检测和对比各轴速度情况即可间接诊断出早期联轴节松弛故障。但是, 对于同车4台电机, 在各轴轮径或空转/滑行状态不一致时均会对电机转速产生影响, 下文将分别基于轮径与空转/滑行状态对电机转速进行分析。

2.1 轮径影响分析

在车轮镟修后, 会进行轮径校验, 同车4根轴的轮径之差最大不超过8 mm^[10-12]。当所有联轴节正常且没有空转滑行发生时, 4台电机对应的车轮踏面的线速度相同。不同轮径在不同速度下对应的电机转速为

$$n = ((v \cdot i \cdot (60/3.6)) / D) / \pi \quad (5)$$

式中: n 为电机转子转速; v 为车辆线速度; i 为齿轮箱传动比; D 为车轮直径。

在正常运行情况, 同车转速对比时, 边界情况为最大轮径与最小轮径大8 mm。考虑最大轮径为840 mm与最小轮径770 mm两种不同情况下, 转速最快与转速最慢的转速差。最大轮径为840 mm时的单车4台电机最大转速差可表示为

$$\Delta n_1 = (v \cdot i / 5.24) / \pi \quad (6)$$

最小轮径为770 mm时单车4台电机最大转速差可表示为

$$\Delta n_2 = (v \cdot i / 4.49) / \pi \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可知, 在列车车轮线速度一定且轮径差相同时, 平均轮径越大, 同车各轴的转速差越大。因此, 在允许的轮径差范围内, 各轴转速本身存在一定固有偏差, 在进行联轴节松弛诊断时需避开由于正常轮径差带来的转速差影响, 避免误判。

2.2 空转/滑行影响分析

在牵引工况下, 若电机轴转速大于车辆综合速度

一定阈值,则认为该轴发生空转;在制动工况下,若电机轴转速小于车辆综合速度一定阈值,则认为该轴发生滑行^[13-14]。当牵引控制单元检测到空转/滑行状态时,将降低牵引力或电制动力实施保护,因此在进行联轴节松弛诊断时,应避免正常的空转/滑行状态。

研究团队分别选取轮径最大(840 mm)与轮径最小(770 mm),且同车4根轴只有1根轴发生空转/滑行,其他各轴速度与车辆速度一致的两种极限情况进行分析。

轮径为840 mm时,发生空转/滑行轴与正常轴的转速差为

$$\Delta n_3 = (19.84 \times \Delta v \cdot i) / \pi \quad (8)$$

轮径为770 mm时,发生空转/滑行轴与正常轴的转速差为

$$\Delta n_4 = (21.65 \times \Delta v \cdot i) / \pi \quad (9)$$

式中: Δv 为发生空转/滑行轴与正常轴的转速差。

由式(8)、式(9)可知,在发生空转/滑行时,轮径越小,轮对间的线速度差越大,则各轴的转速差越大。空转/滑行所引起的轴间转速差是由轮轨可用黏着系数小于需求黏着系数所导致的,且该转速差通常较大。因此,在进行联轴节松弛诊断时,所设定的诊断阈值应小于空转/滑行带来的转速差,以避免误判。

2.3 诊断方案研究

为实现联轴节松弛故障的准确诊断,必须充分考虑轮径差与空转/滑行对电机转速的影响,提升诊断的准确性。联轴节松弛故障基于单车4台电机转速对比进行诊断,确保电机参考转速不会受与其他车轮径差异较大的影响,也避免了在紧急牵引工况下无法获取车辆综合速度导致无法诊断的情况。此外,为了提升诊断的准确性,需要综合考虑牵引、电制动与惰行3种工况进行关联诊断。

2.3.1 牵引工况诊断门槛研究

根据前文分析,牵引工况发生早期联轴节松弛时,故障电机的转速高于其他电机。因此,可将本车4台电机转速与本车电机综合转速进行对比,当某一电机转速持续高于综合转速一定阈值时,即可诊断出可能存在联轴节松弛。对于综合速度的选取,可采用综合对比本车4台电机转速,去掉最高转速与最低转速,取中间2台电机转速的平均值作为综合转速,这样可有效消除轮径差对故障诊断的影响。

确定牵引工况最小转速差阈值时,必须考虑正常轮径差带来的影响。阈值选取的边界条件包括如下两种情况:

①同一转向架内,较大的车轮轮径比另一轮大4 mm;同车另一转向架的较小轮径与该转向架较大轮径一致,且该转向架的较大轮径比较小轮径大4 mm。

②同车2个转向架的两轴轮径分别相等,大轮径比

小轮径大8 mm。

以上两种边界条件对单车综合转速的影响一致,均会导致牵引工况下综合转速比最小轮径对应的车轮转速慢,相当于4 mm轮径差带来的转速差。参考式(6)、式(7),轮径大时影响更显著,因此选取阈值时应考虑本车最大轮径为840 mm时的情况。

最小诊断阈值为

$$\Delta n_{\text{牵}} = (v \cdot i / 10.43) / \pi \quad (10)$$

考虑到传感器测量误差及诊断精度,当检测到某一电机转速与综合转速差超过阈值时,需在牵引工况持续检测到该转速差超过阈值一定时间后锁定故障。根据城市轨道交通车辆牵引/电制动特性,在低速阶段恒力区牵引转矩较大,在恒功区及自然特性区转矩逐渐减小^[15]。由式(2)可知,牵引转矩较大时,转速差上升率较高;随着转矩降低,转速差可能趋于稳定或减小。因此,诊断最佳时机在牵引恒力区运行阶段。目前城轨领域恒力区加速度一般大于等于1.0 m/s²,恒力区与恒功区转折点通常与合同要求的启动加速度有关,以最高速度为80 km/h车辆为例,转折点一般在36~40 km/h。按照1.1 m/s²的加速度计算,恒力区加速时间为10 s左右。考虑到初始加速阶段即便存在联轴节松弛,转速差也可能较小,故障诊断的滤波时间应根据实际情况调整。

在牵引工况下发生空转时,由于各轴的空转程度不一致,也可能导致转速差达到报警门槛值。因此,进行联轴节松弛诊断时必须考虑如下方式以避免空转状态:

①阈值选取应小于空转造成的转速差,即先根据转速差诊断出联轴节松弛,若转速差继续扩大则诊断为空转。

②诊断故障的滤波时间应长于空转状态的滤波时间,即如果转速差一直维持在空转发生前且时间长于空转时间,则诊断为联轴节松弛。

③若率先诊断出空转,则不再继续进行联轴节松弛诊断,避免因空转持续未恢复导致误报。

2.3.2 电制动工况诊断门槛研究

对于电制动工况,发生早期联轴节松弛时,电机转速较其他正常电机低。同时考虑轮径差异常对综合转速带来的影响:轮径越大,转速越慢。同样考虑2.3.1节中提及的两种极限边界条件,轮径为840 mm的车轮转速最慢,其与综合转速之间的速度差可作为电制动工况最小诊断门槛,如式(11)所示。

$$\Delta n_{\text{制}} = (v \cdot i / 10.53) / \pi \quad (11)$$

与牵引工况类似,在电制动工况下检测到某一电机转速与综合转速差超阈值时,需在电制动工况持续检测到转速差超过阈值一定时间后方可锁定故障。根据城轨车辆牵引/电制动特性,在恒力区电制动转矩较大,在自然特性区转矩逐渐减小。由式(4)可知,在电制动转矩较大时,转速差上升率较高;随着电制动转

矩降低, 转速差可能会稳定或减小。因此进行诊断的最佳时机在电制动恒力区运行阶段。目前城轨领域电制动恒力区减速度一般不小于 1.0 m/s^2 , 恒力区与自然特性区转折点通常与电制动减速度要求有关。以最高速度为 80 km/h 车辆为例, 电制动恒力区范围一般为 80 km/h 至电空制动转换点 (通常约为 5 km/h)。按照 1.1 m/s^2 恒减速度计算, 恒力区减速时间约为 18 s 。考虑到初始制动阶段即便存在联轴节松弛, 转速差也可能较小, 且根据式(6)、式(7)可知高速时轮径差对转速影响较大, 因此电制动工况诊断的速度区间与故障诊断滤波时间必须根据实际情况进行调整。

进行联轴节诊断必须避开电制动滑行的影响, 阈值选取必须小于滑行速度差造成的转速差, 诊断故障的滤波时间必须长于滑行状态的滤波时间, 若系统先诊断出滑行, 则不再继续进行联轴节松弛诊断。

2.3.3 惰行工况诊断门槛研究

根据 1.2.3 节惰行工况的受力分析可知, 该工况下电机轴、联轴节受力较小, 发生联轴节早期松弛故障时电机转速差只受轮径差影响, 无法有效诊断早期松弛故障, 因此惰行工况不进行联轴节故障诊断。

2.3.4 诊断逻辑研究

根据 2.3.1~2.3.3 节的诊断门槛值设计相应的工程化应用实施逻辑, 诊断逻辑框图如图 5 所示。

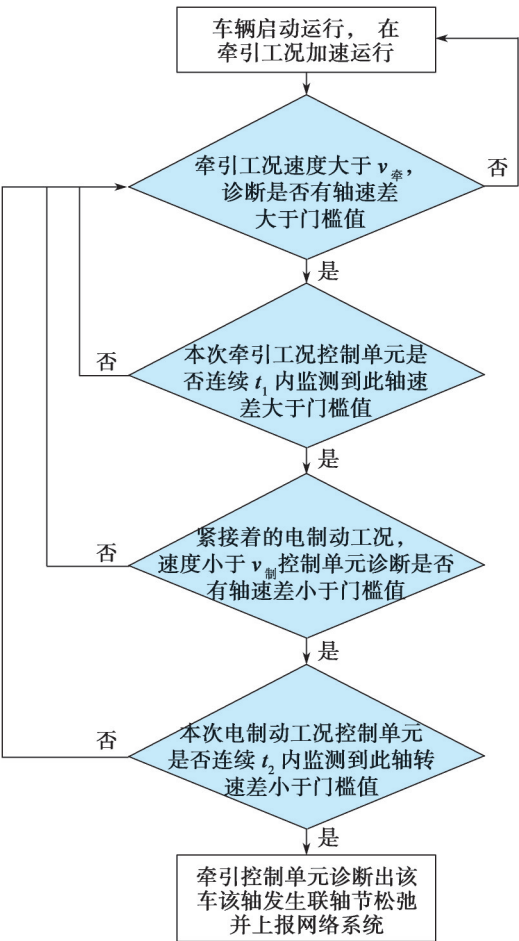


图5 联轴节松弛诊断逻辑框图

Fig. 5 Block diagram of diagnosis logic for coupling relaxation

车辆启动后进入牵引工况加速运行。当牵引控制单元检测到速度大于 $v_{牵}$ 后, 存在某轴轴速与参考轴速之差超过 $\Delta n_{牵}$, 则开始计时; 若持续时间 t_1 内均检测到此轴与参考轴速的轴速差大于 $\Delta n_{牵}$, 则锁定此工况。随后进入电制动工况检测, 当检测到速度小于 $v_{制}$ 后, 存在某轴速与参考轴速之差小于 $\Delta n_{制}$, 则开始计时; 若持续时间 t_2 内均检测到此轴与参考轴速的轴速差小于 $\Delta n_{制}$, 则牵引控制单元诊断出此轴联轴节出现早期松弛并将故障信息上报车辆网络系统。若单次牵引过程或制动过程不满足判断条件, 则重新从牵引工况开始判断。若在牵引或电制动过程中出现空转或滑行情况, 则退出本次诊断, 从下一次牵引工况重新开始。具体阈值与列车运行速度等级、牵引电制动特性等相关, 在实际应用中应结合具体参数进行调整。

3 工程化测试验证

研究团队以国内某城市最高运营速度为 80 km/h 的地铁车辆为研究对象, 进行联轴节松弛故障诊断方案验证。综合考虑轮径差、牵引电制动特性以及空转滑行保护门槛, 设置诊断阈值。

3.1 阈值选取

与阈值选取相关的参数如表 1 所示。

表1 车辆相关特性参数

Table 1 Vehicle-related characteristic parameters

项点	指标
最高运营速度	80 km/h
平均旅行速度	36.3 km/h
轮径范围	770 ~ 840 mm
允许轮径差	同转向架 4 mm, 同车 8 mm
传动比	6.687 5
牵引特性	AW2, 0~40 km/h, 恒力; 40~55 km/h, 恒功; 55~80 km/h, 自然特性
电制动特性	AW2, 5~80 km/h, 恒力
空转保护门槛	轴速大于车辆参考速度 3 km/h
滑行保护门槛	轴速大于车辆参考速度 3 km/h, 持续 3 s 切除电制动

根据表 1 的车辆特性参数, 参考第 2 章研究内容, 考虑一定的裕量防止误报。推荐的牵引、电制动工况下的联轴节早期松弛诊断门槛值如表 2 所示。

3.2 工程化验证

将本文研究的联轴节诊断逻辑软件应用于国内某城市最高运营速度为 80 km/h 的地铁车辆, 在工程化验证中, 诊断出一起联轴节早期松弛故障, 以下分别从牵引、惰行与电制动工况分析故障数据。牵引工况数据曲线如图 6 所示。

表2 联轴节早期松弛故障诊断门槛

Table 2 Diagnosis threshold of early coupling relaxation fault

项点	指标
牵引诊断初始速度/(km·h ⁻¹)	10
牵引诊断速度范围/(km·h ⁻¹)	10~45
电制动诊断初始速度/(km·h ⁻¹)	60
电制动诊断速度范围	60 km/h ~ 电空制动转换点前
牵引速度差门槛/(r·min ⁻¹)	15
电制动速度差门槛/(r·min ⁻¹)	15
牵引滤波时间/s	5
电制动滤波时间/s	5

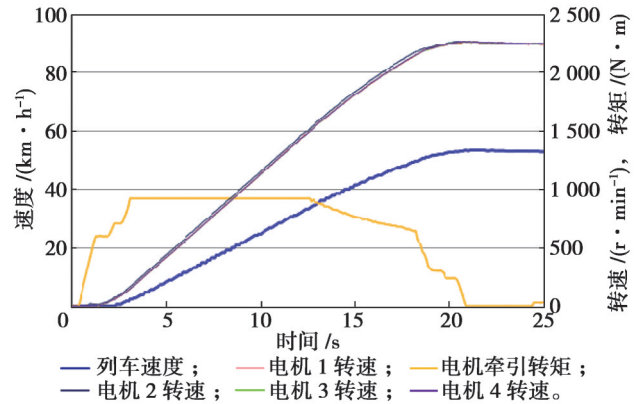


图6 牵引工况数据曲线

Fig. 6 Data curve of traction condition

从牵引工况数据曲线可知，车辆在启动阶段，牵引力矩逐步上升，3 s后达到AW0工况恒力矩，此时列车运行速度为1.7 km/h，此时电机2的转速已明显高于其他轴转速。在5.6 s，列车速度上升至10 km/h，进入联轴节早期松弛故障诊断速度范围，此时电机2转速与本车综合转速速度差为22 r/min，超过故障诊断阈值。在此后连续5 s内，电机2转速始终超过本车综合转速22 r/min左右，在10.6 s车辆速度达到26.8 km/h。因此，牵引工况满足联轴节早期松弛的诊断条件。

惰行工况的数据曲线如图7所示。

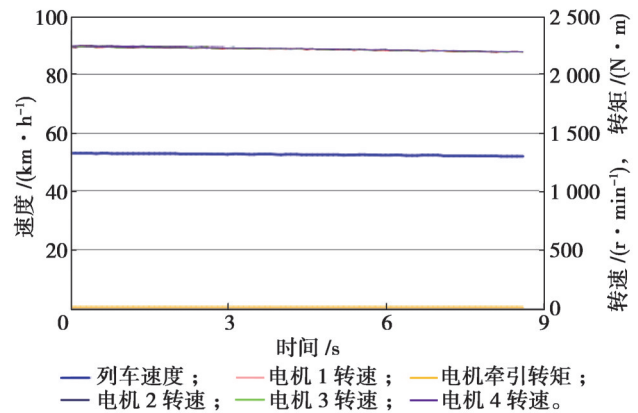


图7 惰行工况数据曲线

Fig. 7 Data curve of coasting condition

从惰行工况数据曲线可知，车辆在惰行的8.6 s时电机转矩为0，惰行开始车辆速度为52.9 km/h，此时4台

电机转速基本一致，在车辆基本运行阻力作用下，电机转速缓慢下降，在全过程中，4台电机转速差最大值为3 r/min，此速度差为轮径与传感器精度综合影响所致。

电制动工况的数据曲线如图8所示。

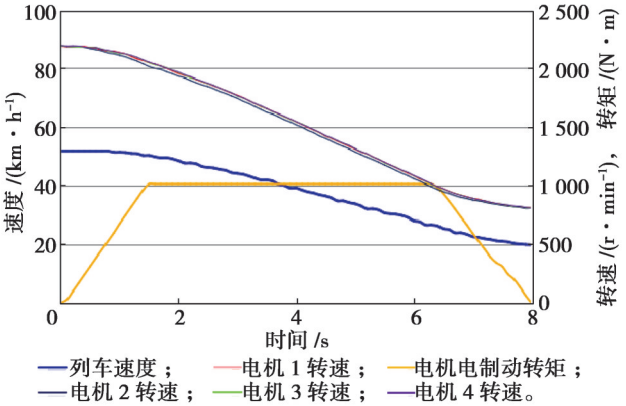


图8 电制动工况数据曲线

Fig. 8 Data curve of electric braking condition

从电制动工况数据曲线可知，车辆在初始制动阶段，电制动力矩逐步上升，在1.5 s上升到AW0工况恒力矩，此时列车运行速度为50.3 km/h，此时电机2的转速已明显低于其他轴电机，电机2转速比本车综合转速低32 r/min，超过电制动工况下联轴节松弛诊断门槛。在此后连续5 s内，电机2转速始终低于综合转速25 r/min左右，在6.5 s，本次电制动过程结束，电机电制动转矩逐渐减小到0，此刻列车速度为26.6 km/h，从此刻开始电机2转速与综合转速之差逐渐缩小，直至第8 s时，电制动转矩降为0，转速差降到1 r/min。因此，在电制动工况已达到联轴节早期松弛的诊断条件。

基于牵引、惰行、电制动工况下各轴电机的速度情况，诊断出电机2发生了联轴节早期松弛故障，对电机2轴的联轴节进行拆解确认，现场实际情况如图9所示。

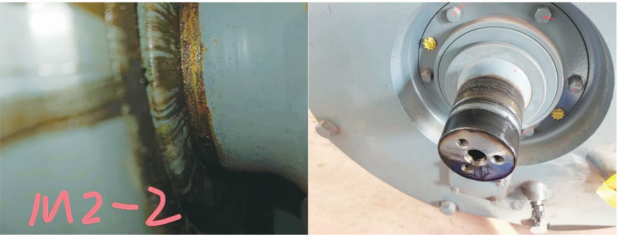


图9 电机2轴联轴节拆解情况

Fig. 9 Coupling disassembly of double-shaft motor 2

根据图9可知，对电机2轴齿轮传动系统进行检查时发现电机联轴节处有渗油情况，拆解联轴节后发现电机轴有明显磨损痕迹，从而证实了本文诊断方法的有效性。

4 结论

本文根据城轨车辆联轴节发生早期松弛故障时的

受力特点分析出当故障发生时电机转速与其他轴电机转速存在明显差异,并在充分考虑轮径差与空转滑行状态对转速影响的基础上确定了适当的诊断阈值,研究成果可为城轨车辆联轴节早期松弛故障诊断提供参考。主要研究与测试结论如下:

① 理论研究表明,联轴节早期松弛故障在牵引工况下表现为故障轴转速高于正常轴,在牵引恒力区尤为明显;在电制动工况下表现为故障轴转速低于正常轴,在电制动恒力阶段更加明显;在惰行工况由于电机轴受力较小,不会造成各轴转速有明显差异。

② 根据上述特征开发了故障诊断方法。为确保诊断的准确性,必须考虑轮径差以及空转滑行状态对转速的影响。牵引工况将最小允许轮径与其他正常轮在恒力速度点左右的转速差作为诊断阈值,在诊断中若发生空转则退出本次诊断;电制动工况将最大允许轮径与其他正常轮在适当的恒力速度点的转速差作为诊断阈值,在诊断中若发生滑行则退出本次诊断,从下一次牵引开始重新进行诊断。

③ 设计相应的故障诊断逻辑,基于具体项目的车辆特性参数选取诊断阈值。工程化验证结果表明,采用本文方法成功诊断出联轴节早期松弛故障,故障数据与理论分析一致。拆解检查发现故障轴联轴节渗油、电机轴磨损,进一步验证了方法的实用性。

参考文献:

- [1] 刘雄. 系列化中国标准地铁列车牵引系统设计[J]. 机车电传动, 2022(2): 55-66.
LIU Xiong. Design of traction system for serialized China standard metro train[J]. Electric drive for locomotives, 2022(2): 55-66.
- [2] 杨绍普, 顾晓辉, 刘永强, 等. 转向架关键运动部件动力学机理与故障诊断研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 225-243.
YANG Shaopu, GU Xiaohui, LIU Yongqiang, et al. Review of dynamic mechanism and fault diagnosis for key rotating components of bogies[J]. Journal of mechanical engineering, 2023, 59(20): 225-243.
- [3] 周佐斌, 陈国胜, 张又孔, 等. 地铁车辆齿轮传动系统动态啮合特性研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(6): 28-33.
ZHOU Zuobin, CHEN Guosheng, ZHANG Youkong, et al. Research on dynamic meshing characteristics of metro vehicle gear transmission system[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46(6): 28-33.
- [4] 王靖岳, 王浩天, 郭立新. 齿轮传动系统故障诊断技术的研究进展[J]. 机械传动, 2016, 40(8): 185-192.
WANG Jingyue, WANG Haotian, GUO Lixin. Research progress of fault diagnosis technology of gear transmission system[J]. Journal of mechanical transmission, 2016, 40(8): 185-192.
- [5] 许南南, 许浩翔, 张章. 一种地铁列车齿轮传动系统弛缓状态诊断方法[J]. 机车电传动, 2019(6): 115-117.
XU Nannan, XU Haoxiang, ZHANG Zhang. Method for diagnosing relaxation state of metro train gear transmission system[J]. Electric drive for locomotives, 2019(6): 115-117.
- [6] 李学明, 倪强, 刘侃, 等. 基于系统信号时序特征辨识的电力机车齿轮弛缓故障实时诊断[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1200-1209.
LI Xueming, NI Qiang, LIU Kan, et al. Real-time diagnosis of gear slack fault in electric locomotive based on system signal time-series feature recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1200-1209.
- [7] 谭斌. HXD3C型机车牵引电机小齿轮弛缓故障报警后的分析及处理[J]. 机车电传动, 2014(6): 97-98.
TAN Bin. Analysis and treatment of pinion relaxation fault alarm for traction motor of HXD3C locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2014(6): 97-98.
- [8] 夏金凤, 王艳, 任广慧. 机车动轮弛缓的防止措施[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(3): 65-66.
XIA Jinfeng, WANG Yan, REN Guanghui. Prevent measure for locomotive motor wheel relaxation[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2009, 32(3): 65-66.
- [9] 曹殿涛, 刘振海. 牵引电机轴承固死及小齿轮弛缓故障处理[J]. 机车电传动, 2005(3): 72-73.
CAO Diantao, LIU Zhenhai. Failure handling of bearing blocking and pinion slack for traction motor[J]. Electric drive for locomotives, 2005(3): 72-73.
- [10] 郭燕辉. 地铁车辆轮径差限值的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 41-46.
GUO Yanhui. Research on wheel diameter difference limit value of metro vehicle[J]. Urban mass transit, 2023, 26(4): 41-46.
- [11] 谷健, 任宁宁. 城市轨道交通车辆牵引系统轮径校准功能研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 79-84.
GU Jian, REN Ningning. Research on wheel diameter calibration function of urban rail transit vehicles traction system[J]. Railway signalling & communication engineering, 2022, 19(9): 79-84.
- [12] 梁大伟, 杨其林, 王善芬, 等. 列车轮径差对牵引系统的影响及相应保护措施研究[J]. 铁道车辆, 2018, 56(5): 33-36.
LIANG Dawei, YANG Qilin, WANG Shanfen, et al. Study on the influence of wheel diameter difference on traction system and corresponding protection measures[J]. Rolling stock, 2018, 56(5): 33-36.
- [13] 秦孝峰, 张龙平, 王好德, 等. 基于速度变化率检测的地铁车辆防空转/滑行控制策略[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(4): 76-78.
QIN Xiaofeng, ZHANG Longping, WANG Haode, et al. Anti-aircraft turn/taxi control strategy of subway vehicles based on speed change rate detection[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2018, 41(4): 76-78.

[14] 刘俊明, 李科, 路向阳, 等. 无人驾驶地铁列车防空转防滑行的研究[J]. 机车电传动, 2022(1): 37-44.
LIU Junming, LI Ke, LU Xiangyang, et al. Research on anti-slip and anti-slide for driverless metro train[J]. Electric drive for locomotives, 2022(1): 37-44.

[15] 吴云飞, 陆远基, 牟蓉, 等. 基于牵引制动特性的地铁车辆启动策略优化研究[J]. 机车电传动, 2023(6): 99-105.
WU Yunfei, LU Yuanji, MOU Rong, et al. A study on optimization of starting strategy for metro trains based on traction and braking characteristics[J]. Electric drive for locomotives, 2023(6): 99-105.

Research on online monitoring and diagnosis of early coupling relaxation fault based on motor speed

WANG Long¹, PAN Guangyun², WU Yunfei¹, LU Yuanji¹, MOU Rong¹

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Locomotive Maintenance Branch Company, CHN ENERGY Xinshuo Railway, Erdos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: The traction system of urban rail vehicles is equipped with couplings to connect motors and gearboxes, and the coupling status directly impacts the effective transmission of both traction force and electric braking force. A force analysis conducted on motor shafts under traction, coasting, and electric braking conditions reveals that when early relaxation occurs on a coupling, the motor associated with this faulty coupling rotates significantly faster than motors with normal couplings during traction, and significantly slower during electric braking. A fault diagnosis method is proposed based on these characteristic speed differences. The corresponding fault diagnosis logic is designed, and the practical diagnostic model was constructed, with rational diagnosis parameters including thresholds, speed ranges, and delay times, selected according to the traction and electric braking characteristics of vehicles used in specific engineering projects. This approach fully accounts for the influences of wheel diameter differences and slipping/sliding states on motor speeds. The proposed method was successfully validated in a practical engineering application, where an early coupling relaxation fault was identified using this method. Analyzing the fault data revealed that the speed characteristics of the faulty coupling aligned with the theoretical predications. Subsequent disassembly showed clear wear marks on the motor shaft, further confirming the effectiveness of the early coupling relaxation fault diagnosis method developed in this paper. This method provides an efficient and reliable solution for online monitoring in this field.

Keywords: urban rail vehicles; early coupling relaxation; speed difference; fault diagnosis; status monitoring